

På eventyr med plasmoner

16 INGENIØREN · 1. SEKTION · 19. MARTS 2021

FYSIK | NANOVERDENEN SKAL MAXWELLS LIGNINGER MODIFICERES

På eventyr med plasmoner

Vekselvirkningen mellem lys og nanopartikler foregår i grænseområdet mellem klassisk fysik og kvantefysik – det kræver en ny teoretisk forståelse.

Af Jens Ramskov
ram@ing.dk

De store glasmosaikvinduer i middelalderlige storkirker som f.eks. i katedralen i Reims og Notre Dame i Paris er imponerende i deres farvepragt. Det er et helt unikt samspil mellem lys og metaller i glasset, der giver farverne, og teknikken til at fremstille glas i forskellige farver har været kendt i hvert fald siden det 4. århundrede.

Forklaringen på, hvordan farverne opstår, kræver dog en dybere forståelse af vekselvirkningen mellem lys og metaller, og detaljerede beskrivelser herfor blev først for alvor udviklet omkring år 1900 og fremefter baseret på Maxwells ligninger for elektromagnetiske felter fra 1865.

Så længe man holder sig til den klassiske verden, er der dog overensstemmelse mellem teori og eksperimenter, men når man kommer ned i metalpartikler af nanometerstørrelse, begynder den klassiske elektrodynamik at halte.

På den allermindste skala er vekselvirkningen mellem lys (fotoner) og stof (atomer) beskrevet med kvantefysikken og Schrödingergligningen. Men hvor går egentlig grænsen mellem klassisk elektrodynamik og kvanteelektrodynamik, og hvordan kan man mest effektivt tackle dette område teoretisk?

Det er en problemstilling, som N. Asger Mortensen har beskæftiget sig med i årevis. Først som leder af sin egen forskningsgruppe ved DTU Fotonik og siden 2017 som professor ved Syddansk Universitet i Odense ved Center for Nano Optics.

Resultaterne fra fem af hans hovedartikler i fra perioden 2011 til 2017 danner basis for en doktorafhandling om mesoskopisk elektrodynamik, hvor meso referer til mellemområdet – i dette tilfælde mellem klassisk elektrodynamik og kvantefysik.

Mere specifikt fokuserer afhandlingen på, hvordan lys vekselvirker med kollektive svingninger i et metals frie ladningselektroner – sådanne svingninger har en partikellignende natur og kaldes for plasmoner.

Det kan lyde abstrakt, men det har en sammenhæng med forklaringen på, hvorfor farvet glas er farvet – og hvorfor farverne er forskellige.

Kollektive elektronbevægelser

Så lad os begynde med de simple spørgsmål: Hvorfor skinner metaller helt naturligt, og hvorfor er farven for guld markant anderledes end for andre metaller?

Når metaller er gode elektriske ledere, er det, fordi de har frie elektroner. På den måde er et metal at betragte som et plasma med positive ioner og negative elektroner.

Udsætter man nu metallet for et elektrisk felt, vil de frie elektroner samlet set flytte sig påvirket af dette felt. Fjerner man det påtrykte felt igen, vil de frie elektroner påvirket af Coulomb-kræfter fra ionerne bevæge sig tilbage til deres ligevægtsposition. Der vil derved opstå oscillationer af de frie elektroner, indtil disse dør ud pga. dæmpninger.

Svingningen frem og tilbage sker med en karakteristisk frekvens, plasmafrekvensen. På samme måde som fotoner er kvantificering af elektromagnetiske bølger, er plasmoner en kvantificering af plasmaoscillationer.

Sender man en elektromagnetisk bølge ind mod et materiale, kan den kun trænge ind i materialet, hvis frekvensen er over plasmafrekvensen.

Denne frekvens ligger for metaller i det ultraviolette område – typisk omkring 150 nm til 250 nm. Synligt lys i intervallet 380–750 nm har frekvenser under plasmafrekvensen og bliver derved reflekteret. Derfor skinner metaller.

For guld gælder det dog, at der også er andre bidrag end fra de frie elektroner, så blå lys kan i et vist omfang trænge ind i metallet. Det reflekterede lys fra overfladen sårer derfor en del af det blå lys, og guld virker derfor gulligt.

Ved at regulere på indholdet af jern, kobber og andre metaller i deres glas kunne glasmagerne i Middelalderen helt præcist styre glassets farve. Det var et højt specialiseret håndværk, og opskrifterne blev holdt tæt til kroppen.

I dag ved vi, at ikke alene materialet i nanopartiklerne, men også deres form kan påvirke lyset.

Ingen skarp grænse

En dybere forståelse heraf kræver, at man zoomer ind på overfladen af en nanopartikel.

Elektrisk set forsvinder her den skarpe grænse mellem metal og de skarpe omverden. Når overfladeatomer og elektronerne omkring dem polariseres, vil det påvirke det elektromagnetiske felt også nogle få nanometer uden for overfladen.

Det har som konsekvens, at plasmon-resonanserne i metallet også ændrer sig en lille smule, men heldigvis findes der en simpel måde at tage højde for denne effekt på.

Den amerikanske fysiker Peter Feibelman skrev allerede i 1982 en større artikel – faktisk på 120 sider – om dette fænomen med titlen 'Surface Electromagnetic Fields'.

Her introducerede han to parametre, kaldet d-parametrene, der netop tager højde for, at atomernes elektriske felt kan mærkes uden for overfladen.

Feibelman har længe været kendt i forskerkredse, der beskæftiger sig med overfladefysik og -kemi og lavfrekvente elektromagnetiske bølger.

»Blandt mange forskere, der beskæftiger sig med elektrodynamik ved optiske frekvenser, var han dog nærmest overset,« fortæller N. Asger Mortensen.

Det skyldes nok, at man tidligere slet ikke havde mulighed for at lave relevante eksperimenter ved høje frekvenser.

»Jeg blev opmærksom på hans gamle artikel omkring 2014–2015,« siger N. Asger Mortensen, der har været med til at udbrede og videreudvikle Feibelmands formalisme.

Når en elektromagnetisk bølge går fra et materiale med en given dielektricitetskonstant, eksempelvis luft, til et andet materiale med en anden dielektricitetskonstant, eksempelvis et metal, skal de elektriske felter opfylde randbetingelser bestemt af de to dielektricitetskonstanter.

Fidusen ved Feibelmands d-parametre er, at man kan bruge helt den samme formalisme, man skal blot ændre randbetingelserne ud fra d-værdierne.

Håb om måling og tabelisering

»Egentlig er det imponerende, at vi kan bruge en sådan simpel ændring i den klassiske elektrodynamik og få rigtige resultater i et område, hvor kvanteeffekter begynder at få betydning,« siger N. Asger Mortensen.

»Jeg håber, at vi efterhånden kan måle og tabelisere d-parametrene for en lang række metaloverflader, ligesom vi har tabeller med de samme metallers dielektriske funktion,« fortsætter han.

Feibelmands d-parametre er med til at tage højde for et andet forhold, som man også helt generelt må opgive fra den klassiske elektrodynamik – nemlig approximationen om lokalt repons.

I store systemer kan man uden problemer antage, at vekselvirkningen mellem lys og stof kun giver en påvirkning i et enkelt punkt. I kvantemekanikkens verden vil man ændre systemet også uden for påvirkningspunktet. Det svarer lidt til, at hvis man trykker på en gummibold, vil der opstå en bølge også uden for punktet, som påvirkes.

Det danske resume af afhandlingen afsluttes på denne måde:

»Vi er nu på randen af en ny kvante-æra med nye paradigmer inden for lys-stof-vekselvirkninger og med udsigt til ny kvante-informations teknologi. Denne afhandling bidrager med den kvantekorrigerede mesoskopiske formalisme, der understøtter sådanne nye eventyr med plasmoner.«

Det er en vekselvirkning mellem naturvidenskab og ingeniørviden-skab, der skal muliggøre denne udvikling, mener N. Asger Mortensen, som står med et ben i begge lejre. ■



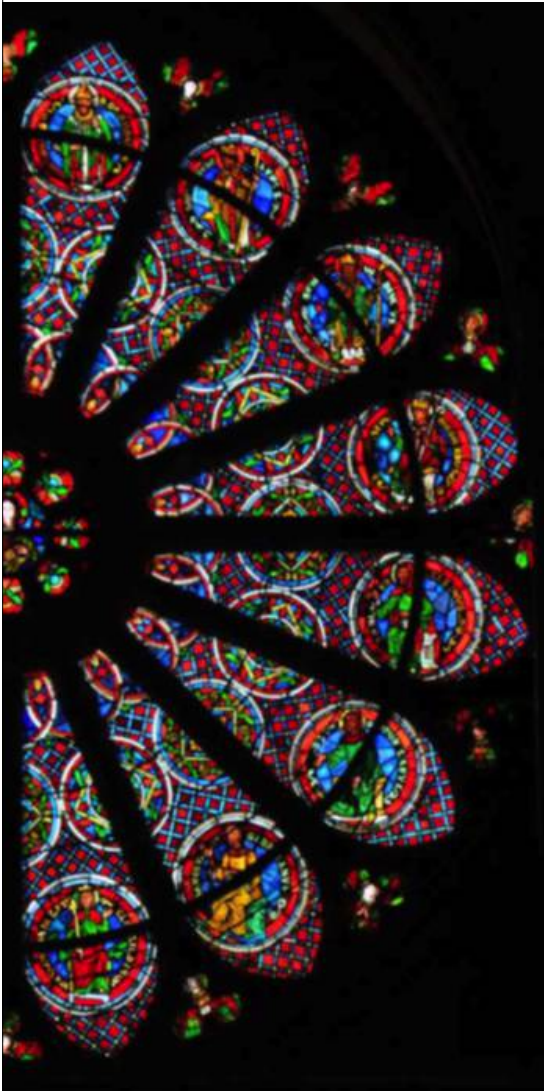
Det store rosevindue i katedralen i Reims har en diameter på 12 meter. Farverne skyldes, at glasset indeholder forskellige grundstoffer som jern, kobber, krom og kobolt.

Foto: Wikipedia



Lycurgus-bægeret fra det fjerde århundrede måler 16 cm i højden. Hvis det belyses forfra, reflekterer det grønt lys. Belyses det indefra, bliver det rødt og næsten gennemsigtigt. Begge dele skyldes en vekselvirkning mellem lys og nanopartikler af sølv og guld i glasset.

Foto: Wikipedia



DOKTORGRADER NÅR ÉN ER GOD, MEN TO ER BEDRE

I grænselandet mellem teknologi og fysik

Professor N. Asger Mortensen er blevet en del af en meget lille kreds af forskere med to doktorgrader inden for naturvidenskab og teknisk videnskab.

Af Jens Ramskov
ram@ing.dk

Professor N. Asger Mortensen fra Syddansk Universitet forsvarede i sidste uge på Niels Bohr Institutet sin afhandling 'Mesoscopic Electrodynamics' for den naturvidenskabelige doktorgrad doctor scientiarum (dr.scient.).

Afhandlingen på 148 sider har undertitlen 'The interplay of nanoscale morphology with the quantum and local response of metals'.

Den dækker over, at afhandlingen fokuserer på vekselvirkning mellem elektromagnetiske bølger, især lys, med nanopartikler af metaller.

Afhandlingen opsummerer resultaterne fra fem videnskabelige artikler publiceret gennem årene 2011 til 2017.

»Det har været en god proces at se tilbage på tingene,« siger N. Asger Mortensen.

Han fortæller, at der har været en del heftige diskussioner inden for forskningsområdet bl.a. om muligheden for tunneleffekter ved optiske frekvenser.

Tunneleffekten er en kvantemekanisk effekt, der tillader en partikel at hoppe hen over et område med forbudt ophold i henhold til klassisk fysik. Effekten kendes og udnyttes bl.a. i scanning tunnelling mikroskoper (STM).

»Her ved vi, at det er en enkelt elektron ad gangen, som foretager tunnelingen,« siger N. Asger Mortensen.

Heftigt og emotionelt

Inden for det optiske område har der været fremlagt en del eksperimenter, der tyder på lignende effekter. Disse har N. Asger Mortensen været meget skeptisk og kritisk over for.

»Der er helt uklart, hvad der eventuelt tunnellerer i disse eksperimenter,« siger han.

Han er af den opfattelse, at dæmpning knyttet til overfladefænomener om ikke principielt umuliggør optisk tunnelling, så gør den meget svær i praksis.

»Diskussionerne har været heftige og til tider meget emotionelle. Det har været givtigt at se på dette igen i et frisk lys,« mener han.

Afhandlingen blev skrevet i løbet efteråret 2019 og indsendt til Det Naturvidenskabelige Fakultet ved Københavns Universitet i december 2019. Nærmest lidt på trods.

»Som forskere er vi vant til at få mange afslag, men her kunne jeg selv tage beslutningen om, hvad jeg ville gøre,« siger N. Asger Mortensen og fortsætter:

»I min naivitet havde jeg forestillet mig, at den kunne blive en del af arrangementerne i 2020 omkring fejringen af 200-året for Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen.«

Da afhandlingen indeholder en omformulering af Maxwells ligninger for elektromagnetisme til også at gælde for nanomaterialer i



N. Asger Mortensen foran et mindesmærke for den tyske fysiker Ernst Abbe i Jena med angivelse af den formel, han fandt for opløsningen ved konventionel mikroskopi (diffraktionsgrænsen). Privatfoto

mellemområdet mellem den klassiske fysik og kvantefysik, var det en relevant tanke.

Men så hurtigt er processen omkring doktorafhandlingerne ikke. Når en doktorafhandling modtages,

bliver der nedsat et bedømmelsesudvalg. Først efter indstilling fra det blev afhandlingen antaget til forsvaret for doktorgraden et år senere – i december 2020.

Adspurgt om årsagen til at skrive en doktorafhandling indrømmer N. Asger Mortensen, at »der er lidt akademisk forfængelighed i at skrive en doktorafhandling« og tilføjer: »Det er ikke noget, der giver nogen form for meritur uden for landets grænser.«

En lille klub

Det er ikke den første doktorafhandling, N. Asger Mortensen har skrevet og forsvaret. I 2006 gjaldt det afhandlingen 'Microstructured Optical Fibres – Theory and Simulations' for den tekniske doktorgrad (dr.techn.) ved DTU.

Den er bl.a. baseret på forskning udført, da han var ansat i NKT-virksomheden Crystal Fibre – der i dag er en del af NKT Photonics.

N. Asger Mortensen er nu en af meget få personer med både en naturvidenskabelig og en teknisk doktorgrad. Ingeniøren har kun kendskab til to andre dobbeltdoktorer inden for naturvidenskab og teknisk videnskab.

Den ene er Bent Flyvbjerg, der ofte omtales som megaprojekterens mester for sit arbejde med at undersøge og skabe teorier for store anlægsprojekter.

Han er uddannet inden for økonomisk geografi og blev dr.techn. i 1991 og dr.scient. i 2007 fra Aalborg Universitet, hvor han var professor, indtil han i 2009 blev professor ved Oxford University i England.

Den anden er kemikeren Bo Brummerstedt Iversen, der er professor ved Aarhus Universitet (AU). Han blev dr.scient. fra AU i 2002 og dr.techn. fra DTU i 2010.

Hans forskning inden for materialekemi er lidt beslægtet med N. Asger Mortensens forskning, idet den vedrører sammenhænge mellem materialers atomare struktur og deres fysiske og kemiske egenskaber i form af magnetisme, styrke, ledningsevne osv., materialerne har på stor skala. ■

HER ER INGEN KRISE

EN HYLDEST TIL KVASIPARTIKLER

JOHN BAEZ, der er en amerikansk matematiker og matematisk fysiker, har i internetmagasinet Nautilus i sidste måned skrevet en hyldest til de kondenserede stoffers fysik.

Han tager udgangspunkt i, at gennembrud inden for fundamental fysik med spørgsmål knyttet til mørkt stof, mørk energi, kvantegravitation osv. er gået helt i stå. Derfor taler mange om, at fysikken er i en generel krise, og den frugtbare forbindelse mellem teori og eksperimenter er gået tabt.

John Baez pointerer, at det ikke er al fysik, der i krise – langt fra – og særligt godt går det inden for det, der kaldes kondenserede stoffers fysik. Her studerer man, hvordan faste stoffer og væsker opfører sig med udgangspunkt i en lang række fænomener, som kan beskrives med en slags pseudopartikler eller kvasipartikler.

Halvlederfysikerne kender huller, som blot er steder i et halvledermateriale, hvor der mangler elektroner. Huller har

masse, ladning osv. og bevæger sig helt som partikler. De er kvasipartikler.

Et hul og en elektron kan binde sig til hinanden og danne en exciton. Fønerer kvasipartikler knyttet til vibrationer, magnoner til magnetisering, plasmoner til kollektive bevægelser af elektroner (plasmaoscillationer), polaritoner er en blanding af lys og stof osv.

»Kort sagt er mulighederne med kondenserede stoffer kun begrænset af vores forestillingssevne og de fundamentale naturlove. Det er et område, hvor der i modsætning til fundamental fysik sker store fremskridt,« skriver John Baez.

»Hvis du hører nogen beklage sig over elendighederne inden for fundamental fysik, skal du tage dem alvorligt, men ikke lade dig gå på af det. Find en god artikel om kondenserede stoffers fysik, og læs den. Det vil øjeblikkeligt muntre dig op,« lyder afslutningen på det lille essay. ■ ram